بررسی خواص سایشی ماده‌ی مرکب زمینه آلومینیم (AA2124) تقویت شده با ذرات بین‌فلزی دی‌سیلیسید مولیبدن *

(یادداشت پژوهشی)

فاطمه پیاده[۱] حسن عبدالله پور[۲]

چکیده

در این پژوهش، ماده‌ی مرکب دارای زمینه‌ی آلیاژ آلومینیم ۲۱۲٤ تقویت شده با ۲۵ درصد حجمی ذرات دی‌سیلیسید مولیبدن تولید و خواص سایشی آن مورد ارزیابی قرار گرفت. تولید این ماده‌ی مرکب به‌روش متالورژی پودر انجام شد. پودر زمینه به‌وسیله‌ی ریزافشانی گازی و ذرات تقویت کننده به‌روش سنتز در دمای بالا به‌شکل خود پیش رونده (SHS) تولید شدند. پس از مخلوط شدن پودرهای زمینه و تقویت کننده توسط آسیای گلوله‌ای، حدیده‌کاری گرم انجام شد و به‌این ترتیب، یک ماده‌ی مرکب با توزیع یکنواختی از ذرات تقویت کننده در زمینه تولید شد. نمونه‌های حدیده‌کاری شده عملیّات حرارتی نوع T6 شدند و آزمون سایش به‌وسیله‌ی دستگاه سایش سوزن بر روی صفحه در دو حالت قبل و پس از عملیّات حرارتی انجام شد. ضریب اصطکاک و ضریب سایش ابعادی نمونه‌های ماده‌ی مرکب به‌دست آمدند و رفتار سایشی با تعیین میزان کاهش وزن سوزن‌های از جنس ماده‌ی مرکب بررسی شد. سطوح سایش این سوزن‌ها و صفحه با میکروسکُپ الکترونی روبشی (SEM) و انجام بررسی‌های EDS مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که سازوکار عمده‌ی سایش از نوع سایش چسبنده بوده است، ولی سازوکارهای سایش اکسیدی و ساینده نیز به مقدار جزئی مشاهده شد. عملیّات حرارتی نیز باعث بهبود مقاومت به سایش نمونه‌های ماده‌ی مرکب به‌میزان ۲۵ درصد شد.

واژه های کلیدی آلیاژ آلومینیم ۲۱۲٤، $MoSi_2$، عملیّات حرارتیT6، سایش.

An Investigation into the Wear Behaviour of Aluminum (AA2124) Matrix Composite Reinforced with Intermetallic $MoSi_2$ Particles

F. Piadeh, H. Abdollah-pour

Abstract

In the present work, the AA2124/25vol.%$MoSi_2$ composite was produced by powder metallurgy technique. The aluminum alloy 2124 powder was produced by gas atomization method and the $MoSi_2$ intermetallic particles were produced through combustion synthesis. The AA2124 matrix powder was mechanically blended with 25vol.%$MoSi_2$ using a ball milling mixer. The blended powder mixture was encapsulated and then hot extruded to composite bars. The heat treatment T6 was carried out on some of the composite samples. Wear tests were performed on both as-extruded and heat-treated samples using a 'pin on disk' apparatus with a tool steel counterpart, a track length of 1000 m, and a speed of 0.1 m/sec. The friction coefficient was measured and the wear mechanism was determined through the evaluation of weight loss of the composite samples. A complete study was done using the scanning electron microscopy (SEM) and EDS analyzing of the worn surfaces. The results indicated that the main wear mechanism is the adhesive wear, however, the oxide and abrasive wear mechanisms were observed to slightly happen. The heat treatment improved the wear resistance of the composite samples for 25 percent in comparison with the as-extruded samples.

Keywords 2124 Aluminium alloy, $MoSi_2$, T6 heat treatment, wear.

---

* نسخه‌ی نخست مقاله در تاریخ ۹۱/٦/۱۸ و نسخه‌ی پایانی آن در تاریخ ۹۲/۹/۲۵ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده مسئول، مربی، دانشکده فنی و مهندسی، مجتمع آموزش عالی اسفراین.

(۲) استادیار، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه سمنان.

مقدمه

علی‌رغم مزایای بسیاری که استفاده از آلیاژهای آلومینیم در کاربردهای مختلف دارد، مقاومت به سایش این آلیاژها بسیار اندک است. تقویت آلومینیم به‌وسیله‌ی ذرات سخت سرامیکی یکی از روش‌های افزایش سختی و مقاومت به سایش این آلیاژها در دهه‌های اخیر بوده است. امروزه، این مواد مرکب کاربردهای بسیاری در صنایع مختلف دارند. به‌عنوان مثال، مواد مرکب زمینه آلومینیم تقویت شده با ذرات سرامیکی کاربید سیلیسیم و یا آلومینا، در ترمز خودرو (دیسک ترمز، لنت ترمز و جداره‌ی پیستون) یا در هواپیما به‌کار می‌روند و عمل‌کرد سایشی نسبتاً خوبی همراه با افزایش سختی و کاهش وزن را به‌دنبال داشته‌اند[1-13]. با این‌حال، گزارش‌هایی نیز وجود دارند که عمل‌کرد سایشی این مواد مرکب را در مقایسه با خواص سایشی آلیاژهای آلومینیم، چندان مطلوب آمیز نشان نمی‌دهند، [4-7]، و حتّی برخی از محققان، [8-11]، نشان داده‌اند که سرامیک‌های سخت به‌دلیل ماهیّت ساینده‌ی خود، مقاومت به سایش را در این مواد مرکب کاهش می‌دهند. ترکیب‌های بین‌فلزی به‌عنوان گروه جدیدی از تقویت‌کننده‌ها در سال‌های اخیر مورد توجه بوده‌اند. از مهم‌ترین این تقویت‌کننده‌ها می‌توان به ترکیب‌های آلومینایدی و سیلیسیدی اشاره کرد[2,3,8-12]. مطالعات اندکی در زمینه‌ی مقاومت به سایش مواد مرکب تقویت شده با این ذرات وجود دارد[3]. گزارش شده است که ترکیب های بین‌فلزی NiAl و Ni_3Al همانند SiC، مقاومت به سایش آلیاژهای آلومینیم را افزایش می‌دهند[3,13].

از میان ترکیب‌های بین‌فلزی، $MoSi_2$ به‌دلیل داشتن مدول کش‌سان بالا[3] ، و شباهت بسیار زیاد خواص به SiC، [8]، می‌تواند جانشین مناسبی برای سرامیک‌ها باشد. افزون بر این، $MoSi_2$ ماده‌ای با مقاومت به حرارتی بسیار بالایی است[9]. بنابراین، پایداری حرارتی در دمای بالا یکی دیگر از مزیت‌های این تقویت کننده‌ی بین‌فلزی است. سختی و استحکام بالا از یک سو و ماهیّت بین‌فلزی (یا سازگاری بیش‌تر آن با زمینه‌ی فلزی) و پایداری حرارتی آن از سوی دیگر، این ترکیب بین‌فلزی را قابل رقابت با SiC کرده است.

در این پژوهش، رفتار سایشی آلیاژ آلومینیم ۲۱۲٤ تقویت شده با ذرات ترکیب بین‌فلزی $MoSi_2$ که به‌روش متالورژی پودر تولید شده‌اند و نیز، تأثیر عملیّات حرارتی بر روی آن، مطالعه شده است.

مواد و روش تحقیق

در تولید نانوماده‌ی مرکب AA2124/25vol.%$MoSi_2$، از پودر آلیاژ آلومینیم ۲۱۲٤ با اندازه‌ی ذرات کم‌تر از ٦۰ میکرون تولید شده به‌روش ریزافشانی گازی (محصول شرکت ALPOCO انگلیس) و ذرات پودر $MoSi_2$ تولید شده به‌روش سنتز احتراقی (محصول شرکت INASMET اسپانیا) استفاده شد. اندازه‌ی میانگین ذرات $MoSi_2$ به‌وسیله‌ی آسیای مکانیکی دیسکی، به کم‌تر از ۲۵ میکرون رسانده شد. پودرهای زمینه و تقویت کننده با نسبت ۲۵ درصد حجمی $MoSi_2$ در آسیای گلوله‌ای با سرعت ۲۰۰ دور در دقیقه به‌مدّت زمان ٤ ساعت مخلوط شدند و پس از آن، مخلوط پودر ماده‌ی مرکب حاصله درون یک استوانه‌ی آلومینیمی قرار داده شد و در دمای $^{\circ}C$ ٤٥۰ به‌مدّت ۱٥ دقیقه با سرعت ۰/٤ میلی‌متر بر ثانیه و با نسبت حدیده‌کاری (اکستروژن) ۱٤:۱، به یک میله تبدیل شد. نمونه‌هایی با ابعاد یکسان (قطر و ارتفاع ۱۰ میلی‌متر) برای عملیّات حرارتی T6 (شامل محلول‌سازی در دمای $^{\circ}C$ ٤٩٥ به‌مدّت ۱ ساعت و پیرسازی مصنوعی در دمای $^{\circ}C$ ۱۹۰ به‌مدّت ٥ ساعت، [3,14]) انتخاب شدند. سختی‌سنجی توسط دستگاه Alph Durometer مدل ۲٥۳۰۱ بر حسب برینل (نیروی ۱۲٥ کیلوگرم و قطر ساچمه‌ی ٥ میلی‌متر) انجام شد. ماده‌ی مرکب تولید شده در شرایط بعد از حدیده‌کاری و بعد از

عملیّات حرارتی T6، تحت آزمون سایش قرار گرفت. آزمون‌های سایش با توجه به استاندارد ASTM G99-95) و به‌وسیله‌ی دستگاه سایش ترکیبی انجام شد.

در این تحقیق، آزمون سایش از نوع سوزن بر روی صفحه در شرایط خشک و در محیط هوا با دمای بین $^{\circ}C$ ١٩ تا $^{\circ}C$ ٢١ و رطوبت ٣٩ تا ٤٠ درصد انجام شد. برای انجام آزمون‌های سایش، نیروهای عمودی ٢٠، ٤٠ و ٦٠ نیوتن و سرعت لغزش ثابت ٠/١ متر بر ثانیه انتخاب شدند. مسافت لغزش برای همه‌ی نمونه‌ها ١٠٠٠ متر در نظر گرفته شد[15]. نمونه‌ی صفحه‌ای که به‌عنوان سطح مقابل نمونه‌های ماده‌ی مرکب در آزمون‌های سایش استفاده شد، از جنس فولاد ابزار T4 با سختی ٦٥ راکول‌سی بود. نمونه‌های ماده‌ی مرکب به‌شکل سوزن‌هایی به‌قطر ٥ میلی‌متر و ارتفاع ٣٠ میلی‌متر تراش‌کاری شدند. قبل از انجام هر آزمون و برای هر ١٠٠ متر مسافت لغزش طی شده، کاهش وزن نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. نمودار تغییرات کاهش وزن بر حسب مسافت لغزش برای نمونه‌ها رسم شد. تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت لغزش حین انجام آزمون اندازه‌گیری و ثبت شد. عامل ضریب سایش ابعادی نیز با استفاده از معادله‌ی آرکارد، [3]، محاسبه شد:

$$\text{ضریب سایش ابعادی}\left(\frac{mm}{N.Km}\right)=\frac{\text{حجم کاهش}\ (mm3)}{\text{اعمالی نیروی}\ (N).\ \text{لغزش مسافت}\ (Km)} \qquad (١)$$

به‌منظور تعیین سازوکار سایش، از ساییدگی نمونه‌های ماده‌ی مرکب با استفاده از میکروسکُپ الکترونی روبشی از نوع Philips XL30 تصویرهایی تهیّه شد. افزون بر این، از روش آزمون EDS (Rontec) هم استفاده شد.

نتایج و بحث

جدول (١) نتایج سختی‌سنجی بر روی نمونه‌های ماده‌ی مرکب را نشان می‌دهد. افزایش سختی بعد از عملیّات حرارتی، ناشی از رسوب فازهای ثانویّه درون زمینه می‌باشد. تحلیل رفتار عملیّات حرارتی این ماده‌ی مرکب، در مقاله‌ی قبلی نویسندگان این مقاله آمده است [١٤].

جدول١ نتایج سختی‌سنجی نمونه‌های ماده‌ی مرکب $AA2124/vol\%25MoSi_2$.

شرایط	سختی (HB)
حدیده‌کاری شده	١٦١
عملیّات حرارتی شده (T6)	١٩٦

جدول ٢ تغییرات کاهش وزن بر حسب مسافت لغزش در نمونه‌های ماده‌ی مرکب $AA\ 2124/vol\%25MoSi_2$ به‌ازای نیروهای مختلف و در شرایط بعد از حدیده‌کاری و بعد از انجام عملیّات حرارتی T6 .

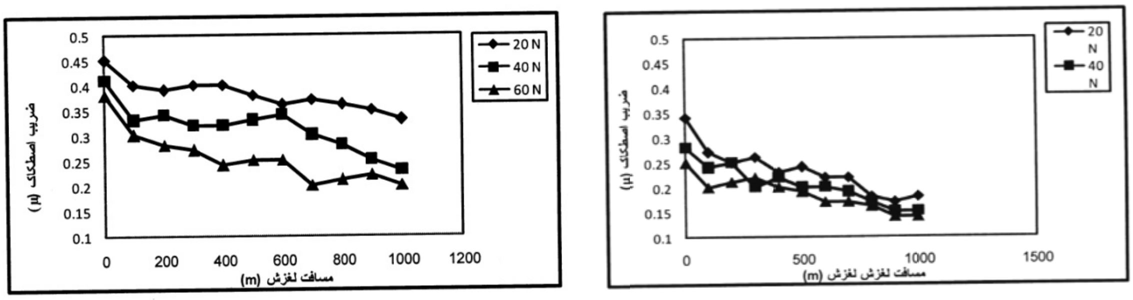
شرایط	مسافت لغزش (m)	نیروی اعمالی ٢٠N	نیروی اعمالی ٤٠N	نیروی اعمالی ٦٠N
حدیده‌کاری شده	١٠٠	٠/٥	٠/٨	١/٤
	٢٠٠	١	١/٨	٢/٧
	٣٠٠	١/٦	٢/٩	٤
	٤٠٠	٢/٣	٤/٢	٥/٢
	٥٠٠	٣/١	٥/٣	٦/٤
	٦٠٠	٣/٨	٦/٣	٧/٩
	٧٠٠	٤/٣	٧/٤	٩/١
	٨٠٠	٤/٩	٨/٢	١٠/٥
	٩٠٠	٥/٥	٩/٢	١١/٤
	١٠٠٠	٦	١٠/١	١٢/١
عملیّات حرارتی شده (T6)	١٠٠	٠/٣	٠/٥	٠/٥
	٢٠٠	٠/٧	١/١	١/٥
	٣٠٠	١/٢	١/٨	٢/٨
	٤٠٠	١/٧	٢/٥	٣/٢
	٥٠٠	٢/٢	٣/١	٤/٤
	٦٠٠	٢/٦	٤/٥	٦/٢
	٧٠٠	٣/٣	٥/٥	٧/٨
	٨٠٠	٣/٩	٦/٤	٩
	٩٠٠	٤/٦	٧/١	١٠/٤
	١٠٠٠	٥/٣	٨/٢	١١/١

در جدول (٢)، تغییرات کاهش وزن نمونه‌های ماده‌ی مرکب بر حسب مسافت لغزش نشان داده شده است. با بررسی داده‌های این جدول مشخص می‌شود که با افزایش مسافت لغزش و افزایش نیروی اعمالی، میزان کاهش وزن افزایش یافته است، امّا پس از

عملیّات حرارتی، این میزان کاهش وزن کاهش یافته است. روند کاهش وزن بر حسب مسافت لغزش در این تحقیق مشابه نتایج سایر محققان در این زمینه [3,7]، می‌باشد.

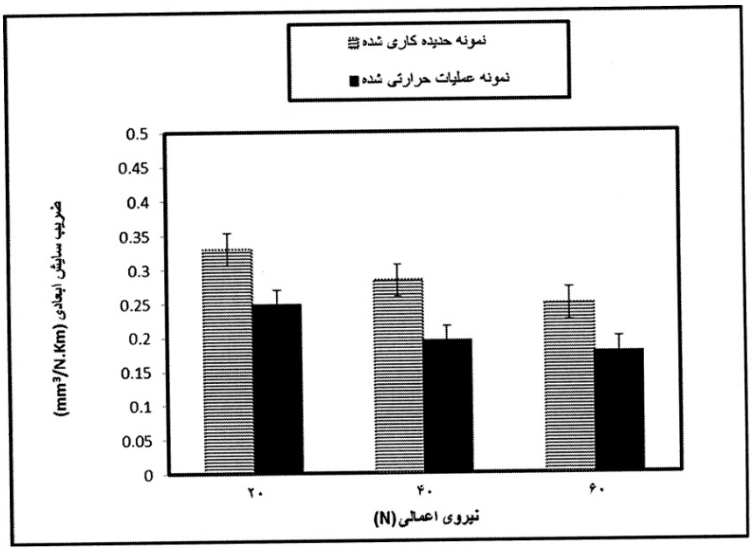
در مراحل اولیّه‌ی آزمون سایش، مساحت ناحیه‌ی واقعی تماس کم است، بنابراین، تنش به‌ازای نیروی ثابت زیاد می‌باشد. با این‌حال، با ساییده شدن سطح و افزایش سطح تماس (با وجود آن‌که انتظار می‌رود با قرارگیری سطح بزرگ‌تری از نمونه در معرض ساییدگی، میزان کاهش وزن بیش‌تر باشد)، به‌علّت این‌که در نیروی ثابت با افزایش سطح تماس تنش کاهش می‌یابد، میزان کاهش وزن تغییر چندانی نمی‌کند و حتی در برخی از موارد کم‌تر هم شده است (جدول ۲). افزون بر این، در نقطه‌های تماس به‌خصوص پس از طی مسافت لغزشی مشخص با افزایش دما، احتمال تشکیل لایه‌های اکسیدی نیز وجود دارد و این لایه‌ها می‌توانند مانند روان‌کارِ خشک عمل کرده و به کاهش سایش کمک کنند[3]. با افزایش نیروی عمودی، میزان کاهش وزن نمونه‌های ماده‌ی مرکب افزایش می‌یابد، زیرا با افزایش نیرو به‌دلیل افزایش بیش‌تر دما، احتمال تشکیل لایه‌ی انتقالی از اکسید بیش‌تر می‌شود، امّا در این‌حالت تنش موضعی افزایش می‌یابد و احتمال این‌که بخشی از لایه‌ی انتقالی با ترک‌خوردگی کنده شود، بیش‌تر می‌شود[16]. میزان کاهش وزن پس از عملیّات حرارتی کم‌تر است جدول (۲) و دلیل آن سختی بالاتر نمونه‌ی عملیّات حرارتی شده می‌باشد. این نتیجه با نتیجه‌ی کار سایر محققان، [15,17]، هم‌خوانی دارد. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۲)، در نیروهای اعمالی ۲۰ و ۴۰ نیوتن و پس از عملیّات حرارتی T6، میزان کاهش وزن به‌ترتیب ۱۲ و ۱۸ درصد کاهش یافته است، ولی در نیروی بالاتر (۶۰ نیوتن) کاهش وزن پس از عملیّات حرارتی ۸ درصد بوده است. به‌نظر می‌رسد که در نیروهای اعمالی بالاتر، تغییر شکل موم‌سان شدیدتر در ناحیه‌ی سطح و زیر سطح سایش باعث افزایش دما در فرایند سایش لغزشی خشک شده باشد. حرارت ایجاد شده به‌علّت کوچک بودن سطح تماس و زمان کوتاه آزمون سایش، قادر به خروج از سطح نبوده و بنابراین، باعث نرم شدن زمینه‌ی آلیاژ شده است. نرم شدن زمینه‌ی آلیاژ در نیروی اعمالی بالاتر اتفاق افتاده است و به‌این ترتیب، تأثیر عملیّات حرارتی که افزایش سختی زمینه است کاهش می‌یابد و تفاوت زیادی بین میزان کاهش وزن در دو حالت قبل و پس از عملیّات حرارتی در نیروی اعمالی بالاتر مشاهده نمی‌شود.

تغییرات ضریب اصطکاک نمونه‌های ماده‌ی مرکب بر حسب مسافت لغزش شکل (۱) نشان می‌دهد که با افزایش مسافت لغزش و نیروی اعمالی، ضریب اصطکاک کاهش یافته است. این روند را در تحقیقات سایرین، [10,16,17]، نیز می‌توان مشاهده کرد. علّت این کاهش، بالا بودن ضریب اصطکاک در لحظه‌ی شروع حرکت است. در این حالت، چون دو جسم از حالت سکون شروع به حرکت می‌کنند، پیوندهای تشکیل شده میان دو سطح باید شکسته شوند تا حرکت شروع شود. بنابراین، اصطکاک ابتدا ناشی از چسبندگی میان سطوح زیاد است و نیاز به نیروی بیش‌تری برای غلبه بر آن است، ولی در ادامه‌ی حرکت، امکان چسبندگی سطوح کم‌تر می‌شود و ضریب اصطکاک (از نوع جنبشی) کاهش می‌یابد. با وجودی که در مسافت‌های لغزش اولیّه، دما در سطح تماس افزایش چندانی نمی‌یابد، دما در ادامه‌ی فرایند لغزش در محل اتصال افزایش می‌یابد و محل اتصال دچار اکسایش بیش‌تری می‌شود. از آنجا که استحکام چسبندگی اکسید با صفحه کم است، این اکسید به سطح نمونه منتقل می‌شود [3,15]. با توجه به اتصال ضعیف بین اکسید بر روی سطوح تماس، تنش برشی کم‌تر می‌شود، [۱۸ و ۱۹]، و در نتیجه، نیروی اصطکاک و به طبع آن، ضریب اصطکاک کاهش یافته است. پس از عملیّات حرارتی نیز مقدار ضریب اصطکاک کم‌تر است، زیرا سختی افزایش می‌یابد و بنابراین، نیروی اصطکاک و در نتیجه، ضریب اصطکاک کاهش یافته است.



(ب) (الف)

شکل ۱ تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت لغزش در نمونه‌ی ماده‌ی مرکب $AA2124/vol\%25MoSi_2$؛ الف) پس از اکستروژن و ب) پس از عملیّات حرارتی T6.

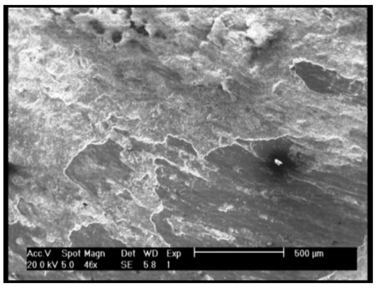


شکل ۲ تغییرات ضریب سایش ابعادی بر حسب نیروی اعمالی در نمونه‌های ماده‌ی مرکب $AA\ 25MoSi_2$ 2124/vol% پس از حدیده‌کاری و پس از عملیّات حرارتی T6.

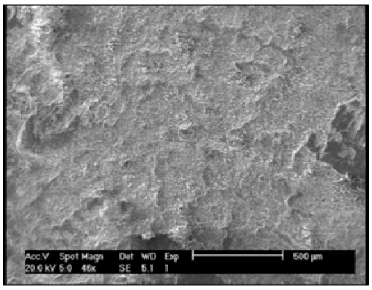
تغییرات ضریب سایش بر حسب مسافت لغزش بسیار ناچیز است و روند خاصی را دنبال نمی کند. بنابراین، تنها مقدار میانگین ضریب سایش برای هر نمونه‌ی ماده‌ی مرکب در نیروهای مختلف محاسبه شده است (شکل ۲). با افزایش نیروی اعمالی، هر چند که میزان کاهش حجم افزایش می‌یابد، تأثیر عامل نیروی اعمالی در معادله‌ی آرکارد بیش‌تر است.

مشاهده‌ی سطح سایش در نمونه‌های ماده‌ی مرکب شکل(۳) نشان می‌دهد که سطح سایش از نواحی روشن و تیره تشکیل شده است. نتیجه‌ی آزمون EDS از این سطوح در شکل (٤) نشان می‌دهد که نواحی روشن در تصویرها حاوی ۱۳ درصد وزنی عنصر اکسیژن می‌باشند. با توجه به این‌که آلومینیم و آلیاژهای آن به‌سرعت با اکسیژن واکنش می‌دهند و لایه‌ی اکسیدی نازک و بی رنگی تشکیل می‌دهند که با سطح آلومینیم یا آلیاژ آن پیوند محکمی ایجاد می‌کند، [۲۰]، نواحی روشن همان لایه‌های اکسید آلومینیم هستند. جابجایی دائمی و شکل‌گیری لایه‌های جدید اکسیدی بر روی سطح تماس، شکلی از سایش است که به سایش نوع اکسیدی معروف است [۲۱]. این لایه‌ی کسیدی حین لغزش می‌تواند از سطح سوزن کنده شده و مجدداً تشکیل شود. با افزایش نیرو، تنش

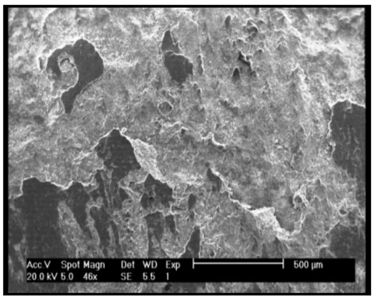
هم زیاد شده است و احتمال چسبندگی سطوح بیش‌تر و ناحیه‌ی تماس نمونه با صفحه افزایش یافته است. به‌دنبال آن، بخش بزرگ‌تری از نمونه به صفحه چسبیده است و گودال‌های عمیق‌تری بر روی سطح ایجاد شده‌اند (نواحی تیره در شکل های (۳و٤)). با توجه به روند جدا شدن ذرات تقویت کننده در مواد مرکب، با افزایش نیرو احتمال جدا شدن تعدادی از ذرات تقویت کننده از سطح سایش بیش‌تر می‌شود و به همین دلیل، میزان ذرات تقویت کننده بین ذرات سایشی و بر روی صفحه بیش‌تر می‌شود. این نتیجه مشابه نتیجه‌ی گزارش شده توسط سایر محققان،[18]، است. شاید بتوان گفت که ذرات تقویت کننده‌ی جدا شده در ایجاد شیارهای بیش‌تر و عمیق‌تر بر روی سطح دخالت داشته‌اند و این منجر به وقوع مقدار جزئی سایش ساینده نیز شده است. با افزایش نیرو، احتمال جدا شدن بخش‌های بزرگ‌تری از ذرات تقویت کننده شده است و ترک‌ها به‌سرعت در زمینه پیشرفت کرده‌اند. این ترک‌ها در نقاط مختلف سطح به هم پیوسته‌اند و سرانجام، بخش بزرگ‌تری از سطح نمونه کنده شده است و گودال عمیق‌تری ایجاد شده است. روند مشابه‌ای در تحقیقات دیاز و همکارانش، [18]، مشاهده شده است. در صورت مخلوط شدن بخش‌های جدا شده با ذرات سایشی، اندازه و مقدار ذرات سایشی جمع آوری شده افزایش یافته است. این نتیجه در تحقیقات سایرین، [7,18]، نیز مشاهده شده است.



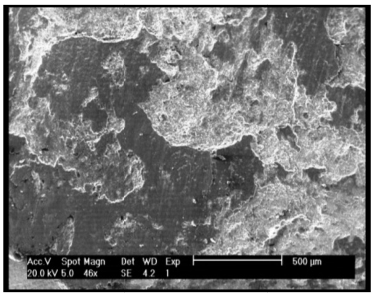
(الف)



(ب)



(پ)

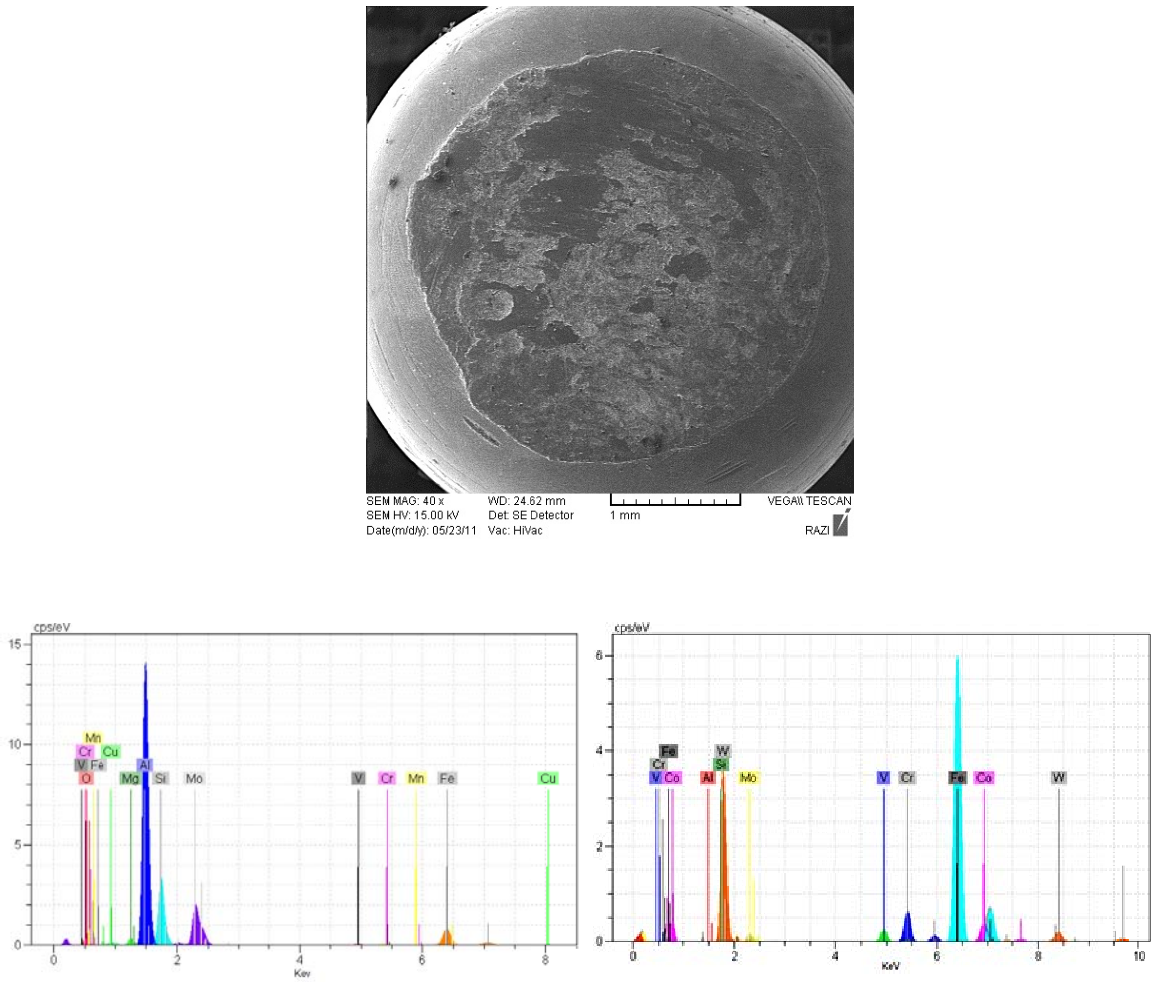


(ت)

شکل۳ تصویرهای میکروسکُپ الکترونی روبشی از سطوح سایش در نمونه‌های ماده‌ی مرکب$AA2124/vol\%25MoSi_2$ در نیروهای مختلف؛ الف) ٤۰ نیوتن پس از حدیده‌کاری، ب) ٦۰ نیوتن پس از حدیده‌کاری، پ) ٤۰ نیوتن پس از عملیّات حرارتی T6 و ت) ٦۰ نیوتن پس از عملیات حرارتی T6.

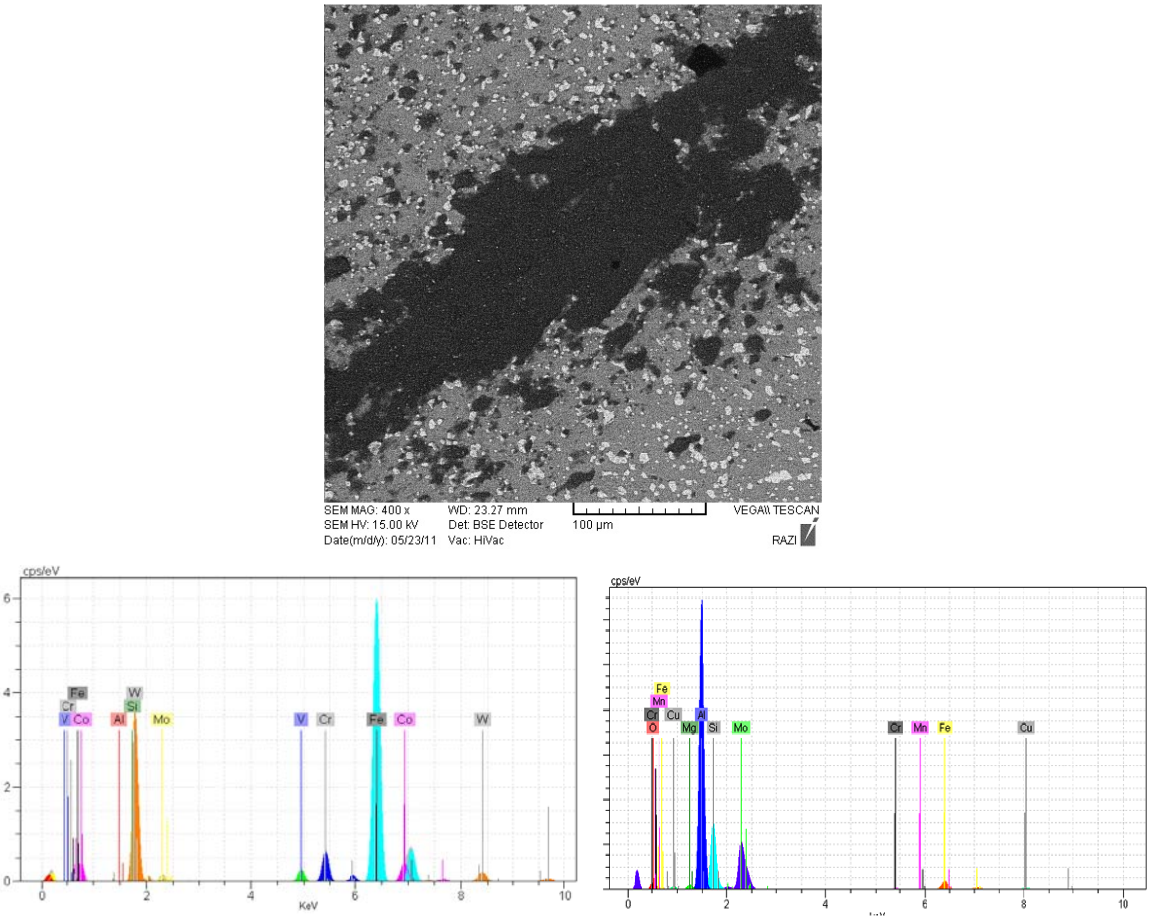
ممکن است که ذرات سایشی تحت تأثیر نیروی اعمالی دوباره در سطح فرو رفته و مقاومت به سایش را بهبود ببخشند. این روند توسط واکر و همکارانش، [3]، نیز گزارش شده است. دلیل روند کند سایش در نمونه‌ها پس از طی مسافت لغزش مشخص، احتمالاً فرورفتن دوباره‌ی ذرات سایشی حاوی ذرات تقویت کننده به سطح نمونه می‌باشد. این ذرات سخت با

فرورفتن در سطح نمونه‌های مادهی مرکب، باعث افزایش کسر حجمی تقویت کننده در سطح و در نتیجه، افزایش سختی سطح شده‌اند. به‌این ترتیب، مقاومت به سایش را بهبود بخشیده‌اند.
بررسی سطح صفحه‌ی استفاده شده برای سایش نمونه-های ماده‌ی مرکب پس از طی مسافت لغزش ۱۰۰۰ متر با میکروسکُپ الکترونی روبشی نشان می‌دهد که قسمتی از سطح صفحه که در تماس با سوزن از جنس ماده‌ی مرکب قرار گرفته است، از نواحی روشن و تیره پوشیده شده است (شکل ۵). نتیجه‌ی آزمون EDS از سطح صفحه نشان می‌دهد که نواحی روشن مربوط به سطح مقابل فولادی و نواحی تیره مربوط به سطح ماده‌ی مرکب است که حاوی ۱۲ درصد وزنی مولیبدن، ۱۱ درصد وزنی سیلیسیم و ٤۰ درصد وزنی آلومینیم می‌باشد. نتیجه‌ی آزمون EDS از سطح سوزن‌های ماده‌ی مرکب (شکل ٤) نشان می‌دهد که سطح آن‌ها پس از سایش در یک نقطه حاوی ۸ درصد وزنی عنصر آهن می‌باشد. با توجه به این‌که ذراتی از هر یک از سطوح کنده شده‌اند و به‌صورت دائم و یا موقّت به سطح دیگر منتقل شده‌اند، سازوکار سایش از نوع سایش چسبنده بوده است
.



(ب) (الف)

شکل٤. تصویر میکروسکُپ الکترونی روبشی و نتایج آزمون EDS از ناحیه‌ی تیره (الف) و ناحیه‌ی روشن سطح سایش نمونه‌ی مادهی مرکب AA 2124/vol%25$MoSi_2$ (ب).



(ب) (الف)

شکل ۵. تصویر میکروسکُپ الکترونی روبشی و نتایج آزمون EDS از سطح سایش صفحه مربوز به ناحیه‌ی تیره (الف) و ناحیه‌ی روشن (ب).

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، مقاومت به سایش لغزشی خشک ماده‌ی مرکب $AA2124/vol\%25MoSi_2$ تولید شده به‌روش متالورژی پودر قبل و پس از عملیّات حرارتی T6 مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر به‌دست آمد:

- عملیّات حرارتی T6 باعث افزایش سختی ماده‌ی مرکب با سازوکار رسوب‌سختی شد.
- آزمون سایش به‌روش سوزن روی صفحه با تحلیل متغیرهای مختلف سایشی از قبیل کاهش حجم، ضریب اصطکاک، شکل بُراده‌ها و سطح صفحه انجام شد. نتایج سایش نشان دادند که انجام عملیّات حرارتی باعث بهبود مقاومت به سایش ماده‌ی مرکب به‌میزان ۲۵ درصد شده است.
- با افزایش نیروی اعمالی به میزان سه برابر و به‌دلیل افزایش تنش، میزان کاهش وزن نمونه‌ها تا دو برابر افزایش یافت.
- وجود عناصر موجود در ساختار ماده‌ی مرکب بر روی سطح صفحه (۱۲ درصد وزنی مولیبدن، ۱۱ درصد وزنی سیلیسیم و ۴۰ درصد وزنی آلومینیم در یک نقطه از سطح صفحه) و ۸ درصد وزنی آهن بر روی یک نقطه از سطح سوزن از جنس ماده‌ی مرکب نشان داد که سازوکار سایش از نوع چسبنده بوده است. با این‌حال، سازوکارهای سایش اکسیدی و ساینده نیز به‌مقدار جزئی مشاهده شدند.

مراجع

1. Muratoglu, M. and Aksoy, M., "Abrasive wear of 2124 Al-SiC composites in the temperature range 20-200°C", Materials Processing Technology, Vol. 174, pp. 272-276, (2006).
2. Torralba, J. M., Velasco, F., Costa, C. E., Vergara, I. and Caceres, D., "Mechanical behaviour of the interphase between matrix and reinforcement of Al 2014 matrix composites reinforced with $(Ni_3Al)_p$", Composites, Part A: applied science and manufacturing, Vol. 33 pp. 427-434, (2002).
3. Walker, J. C., Rainforth, W. M. and Jones, H., "Lubricated sliding wear behaviour of aluminium alloy composites", Wear, Vol. 259 pp. 577-589, (2005).
4. Alpas, T. and Zhang, J., "Effect of microstructure (particulate size and volume fraction) and counter face material on the sliding wear resistance of particulate-reinforced Aluminum matrix composites", Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. 25, pp. 969-983, (1994) .
5. Chen, R., lwabuchi, A., Shimizu, T., Shin, H. S. and Mifune, H., "The sliding wear resistance behavior of NiAI and SiC particles reinforced aluminum alloy matrix composites", Wear, Vol. 213, pp. 175-184, (1997).
6. Alpas, A. T. and. Embury, J. D., "Sliding and abrasive wear behavior of an aluminum (2014)-SiC particle reinforced composite" Scripta Metallurgica et Materialia, Vol. 24, pp. 931-935, (1990) .
7. Wang, Y., Rainforth, W.M., Jones, H.and Lieblich, M., "Dry wear behaviour and its relation to microstructure of nivel 6092 aluminium alloy Ni3Al powder metallurgy composite", Wear, Vol. 25, pp. 1421-1432, (2001).
8 .Torres, B., Lieblich, M., Ibanez, J. and Garcia-Escorial, A., "Mechanical properties of some PM aluminid and silicide rienforced 2124 aluminium matrix composites", Scripta materialia, Vol. 47 , pp. 45-49, (2002).
9. Torres, B., Lieblich, M., "Room and high temperature tensile behavior of a P/M 2124/MoSi2 composite at different heat treatment conditions", J MATER SCI, Vol. 41, pp. 3493–3500, (2006).
10. Corrochano, J., Lieblich M. and Ibez, J., "On the role of matrix grain size and particulate reinforcement on the hardness of powder metallurgy Al–Mg–Si/MoSi2 composites" Composites Science and Technology, Vol. 69 pp. 1818–1824, (2009).
11. Pour, H. A., Lieblich, M., Shabestari, S. G. and Salehi, M.T. , " Influence of pre-oxidation of NiAl intermetallic particles on thermal stability of Al/NiAlp composites at 500ºC", Scripta Materialia, Vol. 53pp. 977–982, , (2005).
12. Pour, H. A., Lieblich, M., Lopez, A. J., Rams, J., Salehi, M. T. and Shabestari, S. G., "Assessment of tensile behaviour of an Al-Mg alloy composite reinforced with NiAl and oxidized NiAl powder particles helped by nanoindentation", Science and Manufacturing, Vol. 38, pp. 2536-2540, (2007).
13. Min, Z., Gaohui, W., Longtao, J. and Zuoyong, D., "Friction and wear properties of TiB2P/Al composite", Composites: Part A, Vol. 37, pp. 1916–1921, (2006).

۱٤. ف. پیاده، و عبدالله پور، ح.،"ساخت و بررسی تأثیر عملیّات حرارتی پیرسختی بر کامپوزیت ذره‌ای $AA2124/25vol\%MoSi_2$"، دهمین همایش ملی- دانشجویی مهندسی مواد و متالورژی، (۱۳۹۰).

15. Lashgari, H. R., Zangeneh, Sh., Shahmir, H., Saghafi, M. and Emamy, M., "Heat treatment effect on the microstructure, tensile properties and dry sliding wear behavior of A356–10%B4C cast composites ", Materials and Design, Vol. 31, pp. 4414–4422, (2010).

16. Tyagi, R., "Synthesis and tribological characterization of in situ cast Al–TiC composites", Wear, Vol. 259, pp. 569–576, (2005).

17. Sameezadeh, M., Emamy M. and Farhangi, H., "Effects of particulate reinforcement and heat treatment on the hardness and wear properties of AA 2024-$MoSi_2$ nanocomposites", Materials and Design, Vol. 32, pp. 2157-2164, (2011).

18. Uyyuru, R. K, Surappa, M. K. and Brusethaug, S., "Effect of reinforcement volume fraction and size distribution on the tribological behavior of Al-composite/brake pad tribo-couple", Wear, Vol. 260, pp. 1248–1255, (2006).

19. Diaz, C., Gonzalez, J. L., Carrasco, J. L., Caruana, G. and Lieblich, M., "Ni_3Al intermetallic particles as wear resistant reinforcement for Al-base composites processed by powder metallurgy", Metallurgical and materials transactions A, Vol. 27, pp. 3259-3266, (1996).

20. Keicher, D. M., Romero, J. A., Atwood, C. L., Griffith, M. L., Harwell, F. P., Greene, D. L. and Smugresky, J. E., "free form fabrication using the laser engineered net shaping LENS process", world congress on powder metallurgy and particulate materials, metal powder industries federation, Washington, (1996).

۲۱. رستگار مقدم، م، ح.، "فرسایش مواد و کنترل آن توسط مهندسی سطح"، موسسه چاپ و انتشارات دانشگاه امام حسین (ع)، (۱۳۸٤).